

第四章-HDR 主要标准

HDR 是 UHD 技术中最重要维度之一，带来新的视觉呈现体验。HDR 技术涉及到采集、加工、传输、呈现等视频流程上的多个环节，需要定义出互联互通的产业标准，以支持规模化应用和部署。本文整理当前 HDR 应用中的一些代表性的国际标准。

4.1 HDR 发展现状

HDR 技术的发展，基于 UHDTV 技术的革新。相较于 HDTV，UHDTV 在三个方面进行了巨大的提升：

1. 视频分辨率。UHDTV 视频的分辨率达到了 3840×2160 ，也就是“4K”分辨率。相较于 HDTV 视频 1920×1080 的分辨率，UHDTV 提供了 4 倍的像素点。
2. 显示设备的动态范围。显示设备的动态范围是指其最大亮度与最小亮度的比值。在新的 UHDTV 显示设备上，可显示亮度的范围为： $0.00005 \text{ cd/m}^2 \sim 1000 \text{ cd/m}^2$ ，对比之下，HDTV 可显示亮度范围仅为： $0.0002 \text{ cd/m}^2 \sim 100 \text{ cd/m}^2$ 。显示设备亮度范围的提升，为 HDR 技术的应用提供了基础。
3. 显示设备的色域范围。UHDTV 中应用的是广色域技术(WCG, Wide Color Gamut)。传统的 HDTV 显示设备支持的是 BT. 709 或 BT. 601 标准下的色域，这两种标准仅仅包含了 33.5% 的可见颜色。UHDTV 显示设备支持的是 DCI-P3 与 BT. 2020 标准下的色域，它们分别包含了 41.8% 与 57.3% 的可见颜色。可见，色域范围的提升是非常明显的。

显示设备性能的提升为 HDR 技术的发展提供了基础。HDR 技术的目的，是在充分利用 UHDTV 亮度范围的基础下，提供更加接近现实场景的视频。在常规亮度区域，HDR 视频与 SDR 视频的亮度基本一致；在低亮度区域，由于 HDR 技术提供了更多的亮度等级，因此 HDR 视频在低亮度区域的细节会得到增强；在高亮度区域，由于 HDR 视频的亮度范围远远高于 SDR 视频，因此大部分 SDR 视频中的峰值亮度在 HDR 视频中能够得到正常显示，只有类似于镜面反射这种亮度的像素点，才会被设计为最高亮度。

HDR 技术包含两个重要方面，第一个是内容制作，第二个是分发与显示。这两方面 HDR 技术与传统电视技术都存在差异。

内容制作方面，HDR 电视的视频源与传统视频源的摄影设备存在区别。传统的摄影设备的曝光度有六阶，而现在的专业 HDR 摄影设备已经具有 14 阶的曝光度（例如电影摄影设备），普通的民用 HDR 摄影设备也普遍具有 8-10 阶的曝光度。这就使得 HDR 视频源具有更好的细节表现能力。

内容分发方面，由于 HDR 视频的 bit 深度要大于传统视频，因此 HDR 技术通常需要更宽的传输带宽或更优质的传输通道。但是，为了实现向下的兼容，部分 HDR 标准中使用了一些技术（例如动态元数据）实现了带宽的压缩，使 HDR 信号在传统的传输标准仍然可以传输。

内容显示方面，HDR 电视能够提供更加广的显示亮度，相较于传统显示设备 0-100nits 的显示亮度，HDR 显示设备通常可以达到 0-10000nits 的显示亮度。由此可以发现，HDR 电视显示的视频是真正的 HDR 视频，不仅仅能够显示更多的图像细节，同时还能够显示更广的亮度；而 HDR 摄影技术拍摄出的 HDR 图像或视频仅仅只能显示更多图像细节，而无法对显示亮度范围做出提升。

4.2 HDR 相关技术组织

本节对主要 HDR 技术规范进行总结。由于 HDR 技术本身基于 UHD TV，因此在 HDR 技术中，除了对显示设备的亮度范围进行了提升之外，对显示设备的颜色范围也作了提升。在 HDR 技术规范的建立过程中，以下组织对 HDR 的各方面技术与参数标准进行了规定：The International Telecommunications Union (ITU), Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE), Consumer Electronics Association (CEA), Ultra HD Alliance, and the Blu-ray Disc Association (BDA)。

SMPTE

SMPTE 在 HDR 方面的标准主要集中在两方面：EOTF（电光转换函数）曲线的标准以及元数据的标准。由于 EOTF 曲线以及元数据是 HDR 技术中非常重要的两部分，因此在后面一节中会对这两部分做出进一步的介绍。

- SMPTE Standard ST 2084:2014 [1]：该标准中对 HDR 技术中使用的 EOTF 曲线进行了定义，其中规定的 EOTF 曲线是 Dolby Vision 测定的 PQ (Perceptual Quantization) 曲线。
- SMPTE Standard ST2086:2014 [2]：该标准中对 HDR 技术中使用的静态元数据进行了定义。
- SMPTE Standard ST 2094:2016 [3]：该标准中对 HDR 技术中使用的动态元数据进行了定义。

ITU

ITU 主要对 HDR 技术中的颜色范围进行了规定。

- ITU-R Recommendation BT.2020 [4]：该标准对 UHD TV 系统以及 HDR 技术中使用的色域进行了定义。
- ITU-R Report BT.2381-0 [5]：该标准对 HDR 电视分发系统的性能做出了规定。同时，该标准中也包括了对 HDR 内容向后兼容 SDR 显示设备的相关标准做出了规定。

CTA

The Consumer Technology Association (CTA)，前身为 CEA，对 HDR 显示设备应当达到的最低标准进行了限制：

- 包含至少一个 HDR 信号接口。
- 能够接受并处理 HDR 静态元数据 (HDMI 接口需要达到 HDMI2.0a 以传递 HDR 元数据)。
- 能够接受并处理由 IP, HDMI 或其他接口得到的 HDR 10 媒体文件。其他 HDR 媒体文件也可进一步得到支持。
- 在显示图像之前能够使用合适的 EOTF 曲线对媒体文件进行处理。

UHD Alliance

UHD 联盟中包括了所有的主要 UHDTV 的内容制造商，内容分发机构以及显示设备制造商。他们对 UHDTV 的相关最低标准进行了限制：

- 分辨率：内容，分发与显示的分辨率都应达到 3840*2160。
- 颜色的 bit 深度：内容，分发与显示过程中使用的 bit 深度最小为 10bits。
- 色域：支持 BT. 2020 标准中的色域。
- 母带制作标准：转换函数为 SMPTE ST2084 标准中的 EOTF 的反函数。颜色空间最小为 100% 的 P3 颜色空间。峰值亮度超过 1000nits；最暗亮度低于 0.03nits。
- 内容转换函数：遵循 SMPTE ST 2084。
- 显示内容标准：转换函数为 SMPTE ST 2084 标准中的 EOTF 函数。颜色空间最小为 90% 的 P3 颜色空间。峰值亮度超过 1000nits 并且最暗亮度低于 0.05nits 或者峰值亮度超过 540nits 并且最暗亮度低于 0.0005nits。

UHD 联盟使 UHDTV 内容能够向下兼容 SDR 显示设备。

4.3 HDR 中的转换曲线

由于 EOTF 函数以及元数据是 HDR 标准中十分重要的组成部分，因此在本节以及下节中，分别对这两部分的相关标准进行介绍。

图像或视频的内容由场景中获取，再到显示设备上显示出来，要经历两个过程：一个是由场景中的自然光线转换到图像编码的光电转换过程；另一个是从图像编码转换到显示设备显示亮度的电光转换过程。由于 HDR 文件的编码长度较长，因此在光电转换过程中通常可以将场景中的亮度高精度地储存在图像编码当中，所以 HDR 转换函数的重点，在于图像编码到显示设备的电光转换过程，这一过程，由光电转换函数（EOTF）来执行。

不同显示设备的峰值亮度和最暗亮度不同，并且亮度分级也不同，因此，不同显示设备有不同的 EOTF。传统的 BT. 709 与 BT. 1886 标准中规定的指数 Gamma 曲线就是 SDR 显示设备的 EOTF。Gamma 曲线是对相对亮度的量化，这些曲线规定了相对亮度，它们将图像编码最大值与显示设备最大亮度进行映射，最小值与最低亮度进行映射，中间也是类似的量化机制。由于传统 Gamma 曲线是根据老式 CRT 显示设备测算的，因此 Gamma 曲线只是对人眼在低亮度区域特性的总结，也就是在 0-100nits 范围内，Gamma 曲线能够准确转换编码与亮度。

在 HDR 技术中，显示设备亮度能达 1000nits，如果仅将 Gamma 曲线拉伸 10 倍，那么在图像中就会出现明显的块状、环状瑕疵现象。因为在高亮度区域（大于 100nits 的区域）人眼有着不同的视觉特性。解决此问题有两种不同设计思路，进而形成两类 HDR EOTF 曲线。

4.3.1 PQ 曲线（SMPTE ST 2084）

在 SMPTE ST 2084 中规定的 EOTF 曲线没有采用之前的相对亮度量化的方式，而是采用了绝对亮度量化方式。规定的 EOTF 曲线将 10-12bits 的编码转换到固定的亮度上，这就要求显示设备的 EOTF 曲线要与母片制作过程中使用的 EOTF 曲线完全一致。

ST 2084 标准中的 EOTF 曲线为了能够满足以后技术的发展，定义了 0.00005nits 到 10000nits 范围内的映射曲线。ST 2084 将每一个视频编码映射到一个在每一个显示设备上都相同的绝对亮度值（例如 10bits 下的 691 码字永远对应于 500nits 的亮度）。

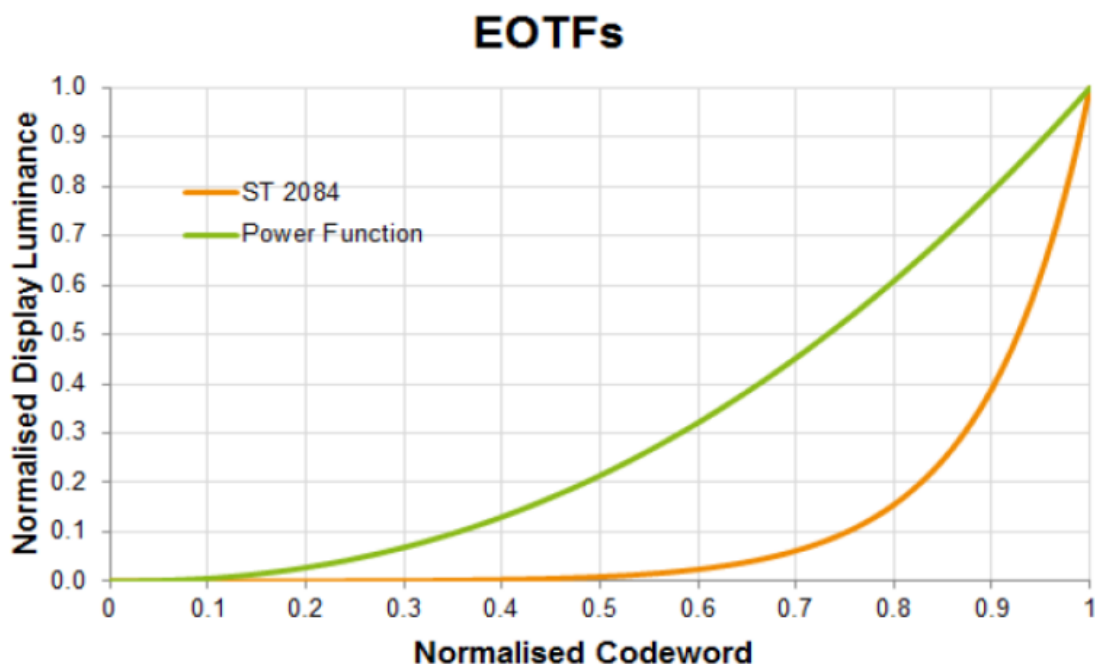


图 4-1 BT.709 与 SMPTE ST 2084 标准下的 EOTF 曲线

SMPTE ST 2084 标准中的 EOTF 曲线基于人眼的对比度敏感函数，它由 Barten 测定，并记录于 ITU-R BT.2246-6 [6]。这种 EOTF 曲线也称为 PQ 曲线。由于 PQ 曲线充分利用了人眼视觉特性，因此它对 bit 深度做了充分利用。PQ 曲线仅仅使用很少码字就可以表示高达 10000nits 的亮度（如图 1 所示，高亮度范围仅仅占用了很小的 bits 范围）。因为人眼在低亮度区域有更高的敏感性，因此在低亮度区域中使用更多码字，可以显著提升人眼的视觉体验，而高亮度区域人眼敏感度较低，因此不需要使用过多码字。

如果仅仅使用上述 PQ 曲线进行转换，会发现实际显示图像的对比度远弱于原始场景。这是因为原始场景的亮度要高于实际设备的亮度，因此经过 PQ 曲线映射后，显示对比度要弱于原始场景对比度。为了解决此问题，需要使用 OOTF (Optical to Optical Transform Function, 光光转换函数) 将极亮区域与极暗区域的亮度进行压缩，并增强中间区域的对比度。

在 SMPTE ST 2084 规定的 PQ 系统中，OOTF 过程在拍摄或制作过程中进行。

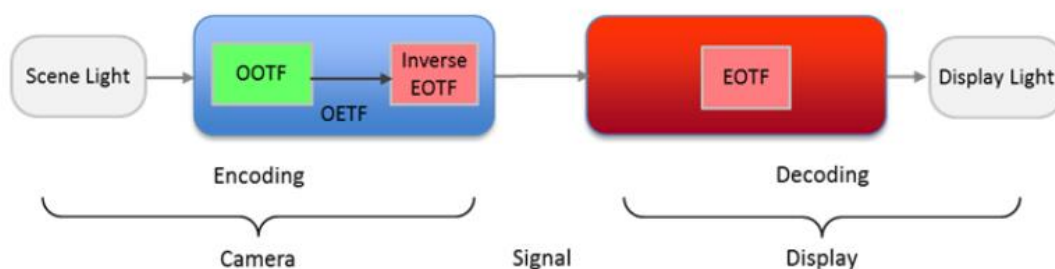


图 4-2 PQ 系统中，OOTF 在拍摄或制作过程中进行

4.3.2 HLG 曲线 (Hybrid Log Gamma)

另一种 EOTF 曲线的设计思路与 PQ 曲线不同。由于 PQ 曲线的设计思路与传统 Gamma 曲线完全不同，因此，PQ 曲线不能向下兼容传统的 SDR 视频的编码。但是，对于电视运营商而言，如果使用 PQ 曲线进行转换，就需要为 HDR 和 SDR 内容分别设计数据流并分别传输数据，这意味着成本的上升。因此，BBC 与 NHK 合作推出了一种新的 EOTF 曲线—HLG 曲线。HLG 曲线的优势在于它能够兼容 SDR 图像的编码。当一个传统显示设备接收到视频信号时，它可以使用传统的 Gamma 曲线将视频显示为 SDR 视频。而一个 HDR 显示设备能够将视频信号通过 HLG 曲线转换为 HDR 视频。这意味着电视运营商能够只传输一种数据流，使得 SDR 用户与 HDR 用户都能够获得电视信号。

HLG 曲线是运营商为了节约传输成本而做出的妥协，它能够很好地兼容 SDR 与 HDR 的数据，但会使得两种视频的观看体验都无法达到最佳。为了实现对 SDR 的兼容，HLG 曲线在低亮度区域的映射曲线就是传统的 Gamma 曲线，而在高亮度区域使用对数曲线进行映射。这也是 Hybrid Log Gamma 名称的由来。

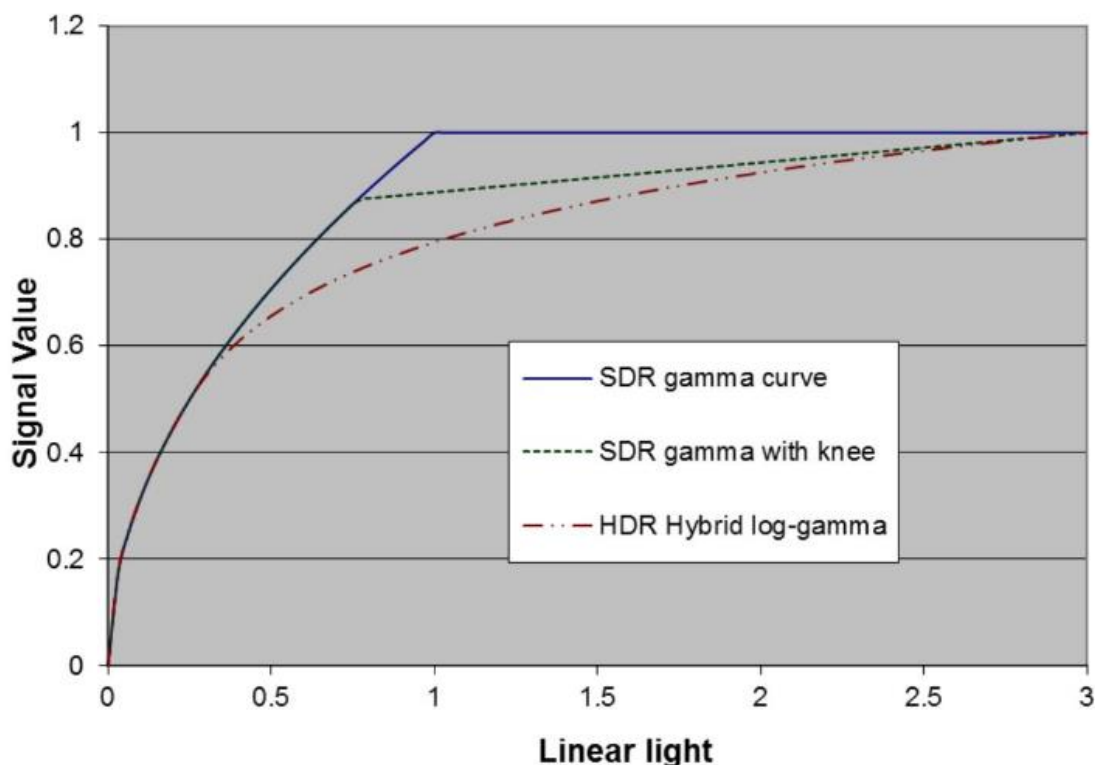


图 4-3 HLG 曲线图像

BBC 公司利用 HLG 曲线进行了小规模 HDR 电视节目制作与传输实验。BBC 制作了自然纪录片“Planet Earth II”的 HDR 版本，并在松下的 HDR 电视上进行了传输与显示实验。同时，由于 UHD 蓝光标准中不支持 HLG 曲线，因此在其节目蓝光版本中，使用 HDR10 标准来替代。

4.4 HDR 元数据规范

HDR 的元数据分为静态元数据与动态元数据两类。

静态元数据

SMPTE ST 2086 标准中，对 HDR 技术中的静态元数据所应遵循的标准进行了定义。在静态元数据中，包含了 HDR 内容的颜色信息以及亮度信息。HDMI 2.0a 支持这种静态元数据的传输。

静态元数据信息中包含了以下内容：以红，绿，蓝三色为基色的颜色信息；HDR 母带的白色点信息；最暗亮度以及峰值亮度。ST 2086 同时也会传输 HDR 内容的下列几种亮度信息：

- 最大内容亮度等级 (MaxCLL, Maximum Content Light Level): MaxCLL 的单位是 cd/m^2 。表示 HDR 内容中最亮的像素点的亮度值。
- 最大平均帧亮度等级 (MaxFALL, Maximum Frame-Average Light Level): 单位为 cd/m^2 。平均帧亮度表示一帧内所有像素点的平均亮度。MaxFALL 表示 HDR 内容中所有帧的最大的平均帧亮度。

动态元数据

SMPTE ST 2094 标准中对 HDR 技术的动态元数据进行了标准定义。动态元数据是指，在传输过程中，传递的是帧与帧之间，或者场景与场景之间的颜色重映射信息 (CRI, Color Remapping Information)。也就是指，动态元数据传递的并非每一帧或每一个场景的绝对亮度与颜色，而是随着时间线传输颜色的变化与亮度的变化。这种做法的优势在于能够有效节约带宽。

动态元数据包含的种类较多，具体可参见 [3]。

4.5 HDR 内容的存储及分发标准

上述各种 HDR 技术规格是 SMPTE, ITU-R 等组织对 HDR 内容应符合的技术要求和限制。工业界与产业界根据这些内容标准，制定出了一些成型的 HDR 格式标准。这些格式标准，包含了 HDR 内容从制作，到传输，再到显示的整个流程中所应遵循的标准。HDR 的整个流程，通常分为两大部分，第一部分是母带制作，第二部分是分发与重放。下面介绍 HDR10, Dolby Vision, BBC/NHK HLG 三个主要 HDR 存储及分发标准。

4.5.1 HDR10

HDR10 标准是由 MPEG 最先发起的。HDR10 格式的设计目的，是为了建立一个“最低限度”的 HDR 标准。MPEG 的研究认为 HEVC main 10 (H.265) 已经足以保证 HDR 内容传输过程中的内容质量以及传输效率。同时 10bits 下的 4:2:0 的编码格式也足以满足 HDR 内容的传输。

基于 MPEG 的结果，Blu-ray Disc Association (BDA), HDMI Forum, UHD Alliance 等组织合力推出了利用 HEVC main 10 压缩与传输 HDR 内容的 HDR 标准。这种最基本的 HDR 标准被称为“HDR10”。HDR10 目前为止并非一个完全的标准，它目前仍然是各种标准与技术的集合体，并且仍然在随着 HDR 技术的发展而拓展。

HDR10 的母版制作过程如图 4 所示。首先，来自相机的线性光图像数据要进行某种形式的实时或离线分级，如通过 HDR 兼容的母片显示器上的视觉结果判断，内容的色彩体积在 BT.2020 规定的颜色空间容器内表示；随后，使用 SMPTE ST2084 中规定的 PQ 曲线[2]将 RGB 4:4:4 格式的图像数据编码为最能体现人类视觉特征的码字（图 5）；最后，将编码的数据分通道量化为 10 比特，执行颜色转换和色度子采样，将信号转化为 Y'Cb'Cr' 4:2:0 格式，并输送到 HEVC 编码器。

传统的 SDR 电视节目使用的 Gamma 曲线是基于电视显像管的特性定义的，无法承载高动态范围的信号，而 PQ 曲线表示的是光的绝对值，在从纯黑到 10000 尼特的范围内明确定义了光的值，因为 EOTF 的作用就是把数字视频信号的编码值换算成光强，所以 PQ 曲线具有更好的可扩展性，另外 PQ 曲线是基于人眼特性的，在人眼敏感的亮度范围中分配较多的码率，而在人眼不太敏感的高光部分则分配较少的码率，既符合人眼的视觉特征，又可以确保数据被充分利用。

ST 2086 标准的静态元数据将最暗亮度与峰值亮度以及其余亮度参数传递给显示设备。如果显示设备的色域小于母带的色域或者显示设备的亮度范围要小于母带的亮度范围，那么，设备就会根据这些静态元数据将色域和亮度范围相对地缩小到显示设备的范围内。

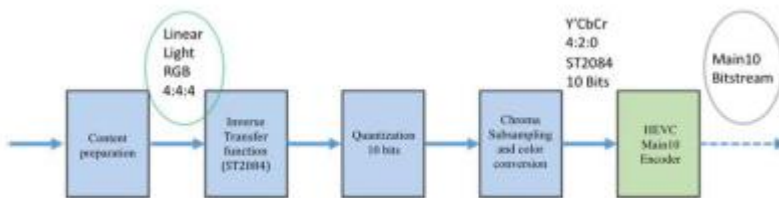


图 4-4: HDR10 内容的母版制作过程[1]

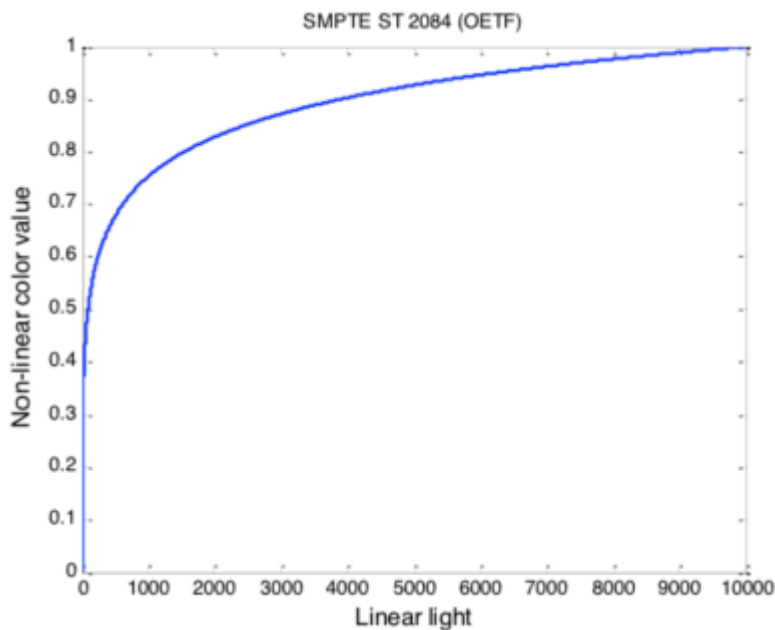


图 4-5: PQ 曲线[1]

HDR10 的传输与播放标准:

- 最小信号通道: HDMI 2.0a
- 重放色域: BT. 2020
- EOTF 曲线: SMPTE ST2084 (PQ) 曲线

- 静态元数据: SMPTE ST2086
- Bit 深度: 10bits

HDR10 显示器的播放过程几乎就是信号母片制作的逆过程, 对信号进行解码, 然后进行反颜色转换和子采样以恢复出 RGB 4: 4: 4 信号(图 6), 最后将该信号应用于 SMPTE ST2084 的播放转换函数 (EOTF), 恢复出线性光值。

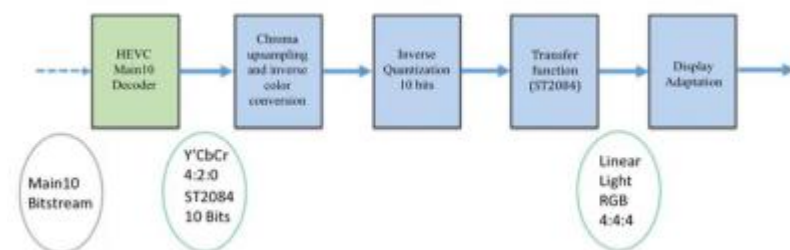


图 4-6: HDR10 内容解码过程[1]

ST2086 元数据中包含了母片显示器的黑电平和峰值亮度以及母片内容的亮度, 如果播放器的色域比视频内容窄或者播放器的峰值亮度低于视频内容, 播放器就可以根据元数据把视频内容映射到更窄的色域或更低的亮度, 同时播放器只需要重映射到视频内容的峰值亮度即可, 而不必达到 ST2084 中的最大值 10000 nit。

4.5.2 Dolby Vision

Dolby Vision 是一种高质量的 HDR 标准。与 HDR10 相比, Dolby Vision 对获得了许可的付费用户提供支持, 并且 Dolby Vision 的 HDR 标准更加严格。Dolby Vision 符合 4K UHD Blu-ray 规格, 是一个端到端、可扩展的系统, 使用 PQ 曲线映射线性光图像数据, 可以按需向下兼容 HDR10 和 SDR 显示器。

Dolby Vision 是杜比 Dolby Atmos 的补充。电影、电视和游戏创作者借助它可以实现自己的创意, 并让消费者体验到沉浸式的内容。DV 关键的一步是 HDR 调色, 包括高动态范围、宽色域以及可能的高分辨率、高帧率。相比于 SDR 动态范围更高、色域更宽的图像, 杜比称为 EDR (Extended Dynamic Range)。

Dolby 的 EDR 信号可通过 HDMI 进行呈现, 并且 Dolby 通过将元数据嵌入内容信号本身, 从而实现了将 12bits 内容深度的文件与元数据同时通过 HDMI 2.0 进行传输, 而不需要像 HDR10 一样, 只可以通过 HDMI 2.0a 进行传输。Dolby 利用专有的动态元数据, 实现亮度与颜色的端到端传输。动态元数据能够传输特定场景的亮度、颜色信息。

Dolby Vision 的母带制作过程有两种不同的设计方式: 单层文件方式与双层文件方式。其中双层文件方式通过将内容分为 base-layer 以及 enhancement-layer 两层, 使得该制作方式制成的母带能够向后兼容 SDR HDTV 以及 HDR10 的显示设备。另一种单层文件方式不提供向后的兼容, 但却能够节约大量的带宽。

- 双层配置包括基本层和增强层, 基本层采用了 10-bit 的 SDR HDTV (非 UHD Blu-ray) 或 HDR10 (可选择 UHD Blu-ray) 规格, 是为了与 SDR 设备兼容, 2-bit 的增强层包含了高动态范围和宽色域的部分 (EDR 增强层), 用于重建 EDR 内容, 当然增强层的传输会消耗一定的带宽。离线内容制作中经常使用双层配置。
- 单层配置常用于实时 EDR 内容制作中, 如在直播和 OTT 中的应用, 这种向后不兼容方案可以节省更多的码率。

Dolby Vision 母带中同时使用了静态元数据与动态元数据。其中使用的静态元数据包括：

- 最暗与峰值亮度
- 颜色表示以及
- MaxCLL
- MaxFALL

Dolby Vision 母带中使用的动态元数据用于描述帧与帧之间的亮度，并将内容与特定显示设备亮度对应。在双层形式的母带制作过程中，动态元数据反应了视频每一帧当中 HDR 内容与 SDR 内容的差异。动态元数据储存在 enhancement-layer 中。单层形式的母带中不包含动态元数据。

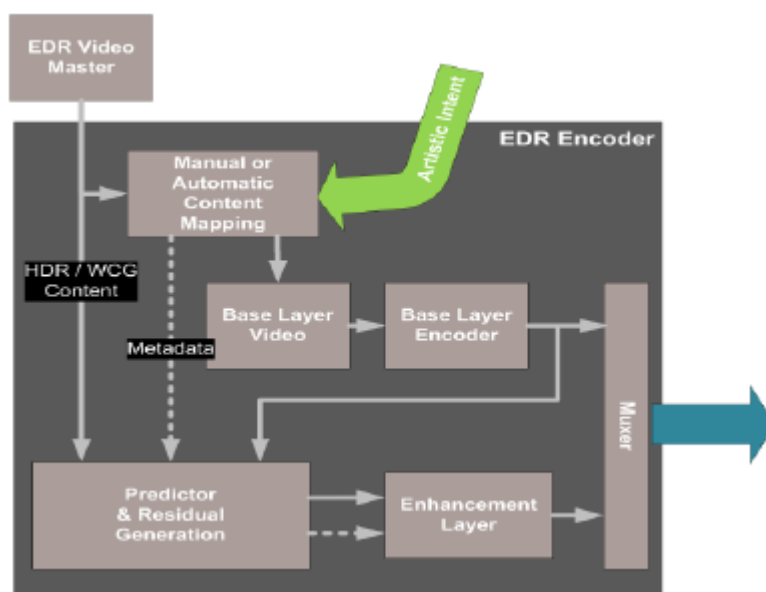


图 4-7: Dolby Vision 母片处理流程[1]

Dolby Vision 的传输与重放标准：

- 最小信号通道：HDMI 1.4
- 重放色域：BT. 2020
- EOTF 曲线：SMPTE ST2084 (PQ) 曲线
- 最大显示亮度：10000nits

所有的 Dolby 显示设备，都应能兼容双层与单层的母带。在解码过程中，对于双层文件，Dolby Vision 显示设备将 base-layer 与 enhancement-layer 分别解码，将 12bit 的文件解码为 10bits 的 base-layer 与 2bits 的 enhancement-layer，然后将两层与动态元数据并进行组合，形成 HDR 视频，然后进行播放。而如果普通显示设备接收到双层文件，则将 base-layer 部分直接进行解码放映即可。解码流程如图 8 所示。

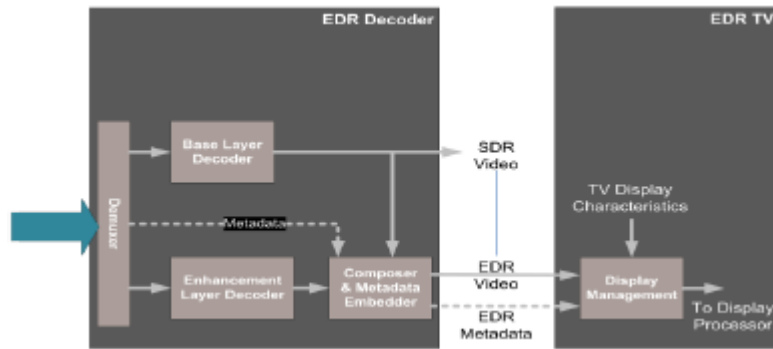


图 4-8: Dolby Vision 内容的解码流程[1]

4.5.3 BBC/NHK HLG

前述的 HDR10 与 Dolby Vision 都是基于 PQ 曲线的 HDR 标准。BBC/NHK HLG 则是基于 HLG 曲线的 HDR 标准。由于 HLG 曲线提供了对 SDR 内容的编码兼容，因此，对于广播公司来说，利用 HLG 曲线可以将 HDR 内容与 SDR 内容流使用同一个数据流进行传输，进而显著降低成本。HLG 系统已经被日本组织 ARIB 纳入 STD-B67 标准中。与 HDR10 一样，HLG 也是一种免费的 HDR 标准。

HLG 系统中使用了混合的 OETF 曲线，在传统 SDR 的较低亮度区域使用标准的 Gamma 曲线，在较高亮度区域使用对数曲线，HLG 的 OETF 曲线和传统 SDR 内容使用的 OETF 曲线如图 6 所示，有了这种混合的 OETF 曲线，就可以播放兼容 SDR 和 HDR 电视的单一的信号/视频流，并且 HLG 系统不依赖于元数据，信号与显示器是相互独立的。使用 HLG 技术不需要付版权费，也不需要经过广播公司和显示设备生产厂家的许可。

HLG 的母带制作过程非常简便，将原始的拍摄的文件利用 HLG 曲线作为 OETF 曲线，并且将色域映射到 BT. 2020 空间内，就可以制成相应的 HLG 文件。由于 HLG 文件同样严格遵循现有的 10bits 的数据流，因此 HLG 可以无缝的通过现有的广播传输方式进行传播，例如 IP、卫星等。HLG 信号被接收后，取决于显示设备的类别，HDR 设备能够将 HLG 信号转换为 HDR 视频播出，SDR 显示设备能够将 HLG 信号转换为 SDR 视频播出。

HLG 的传输与重放标准：

- 最小信号通道：HDMI 1.4
- 重放色域：BT. 2020
- EOTF 曲线：逆 HLG 曲线与 OOTF
- 元数据：无
- Bit 深度：10bits

HLG 格式的亮度也是一种相对的亮度形式，它将最大码字对应于显示设备的最大显示亮度。传统显示设备的 EOTF 并非 OETF 的逆曲线，为了补偿场景亮度，通常还需要使用 OOTF（通常为 1.1 或 1.2 的指数函数）。在 HLG 的重放过程当中，也需要相应的 OOTF 函数，才能够使得画面的对比度不会过低。HLG 中的 OOTF 是一个自动校准的指数函数。根据显示设备动态范围的不同以及场景亮度的不同，指数函数的值会发生改变。对于高动态范围的显示设备以及低场景亮度，通常会使用大的指数值，例如 1.6。而对于低动态范围的显示设备与高场景亮度，通常会选择 1.3 左右的指数值。在实际操作过程中，显示设备将收到的信号经过逆 HLG 曲线，然后计算每个像素点的相对值 Y，以表示像素点的亮度。在后续的 OOTF 校准过程中，利用相对值 Y、最高及最低亮度、场景亮度等

信息进行参数确定，最后再进行亮度映射。

利用相对值 Y 进行亮度映射的优势在于避免了颜色的改变。因为 HLG 标准中不使用元数据，因此直接进行 OOTF 处理可能会造成颜色改变。

整个 HLG 的制作与传输重放流程如下图：

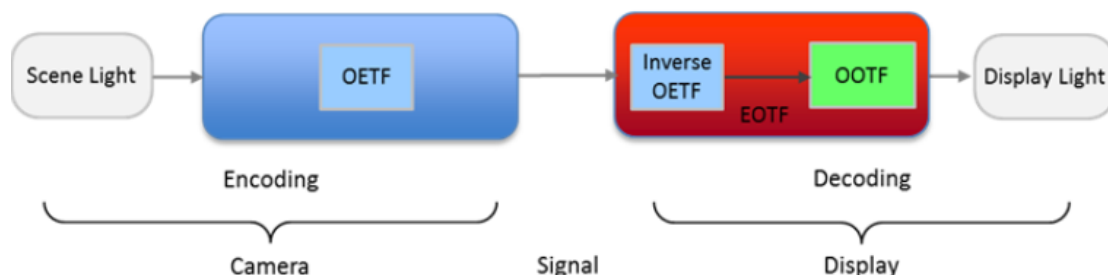


图 4-9 HLG 的制作与重放流程

4.5.4 飞利浦/特艺 SL-HDR1

特艺 (Technicolor) 开发了两种 HDR 技术：第一种是从摄像机获取 10-bit HDR 视频信号，然后生成可以兼容 SDR 和 HDR 显示器的视频信号；另一种称为智能音调管理，提供了一种将 SDR 素材“升级”为 HDR 内容的方法。在 CES 2016 上，特艺和飞利浦 (Philips) 合并了它们的 HDR 技术，即 SL-HDR1 标准。

SL-HDR1 分发系统的主要特征：

- 包含元数据的单层配置：该 HDR 系统是带有附加元数据的单层编码过程，这些附加元数据（相当于每一帧或者每个场景包含几个字节）可以用于后处理阶段，用来重建 HDR 信号。
- 编解码器无关：该 HDR 系统独立于编解码器（推荐使用 10 位编解码器）。
- 兼容 SDR：解码的视频流可以被直接显示在 SDR 显示器上。由于包含元数据，可以通过后处理将解码的 SDR 视频转化为 HDR 视频。
- 保证 HDR 内容的质量：与 HLG 系统相比，编码性能有所提升。
- 根据显示器的性能自适应调整 HDR 内容：当 HDR 内容的峰值亮度高于显示器的峰值亮度时，后处理过程可以在保留所有细节和艺术意图的前提下，将 HDR 内容的峰值亮度调整为显示器的峰值亮度。
- 附加的复杂度有限：预处理和后处理步骤只带来了有限的复杂度。
- 独立于 OETF 函数：预处理和后处理操作是在线性光域中进行的，因此与 OETF 函数是独立的。

SL-HDR1 分发系统如图 8 所示，原始内容首先要经过预处理、后处理和母片处理操作生成 HDR 母片信号和内容元数据，在编码阶段，HDR 母片信号分解为 SDR 信号、内容元数据和动态元数据，SDR 信号通过任意一种编码器（比如 HEVC）进行编码，然后通过现有的 SDR 分发网络进行传输，同时传送的还有动态元数据，在解码端可以同时获得 SDR 视频和 HDR 视频，经过一定的后处理后即可进行显示。

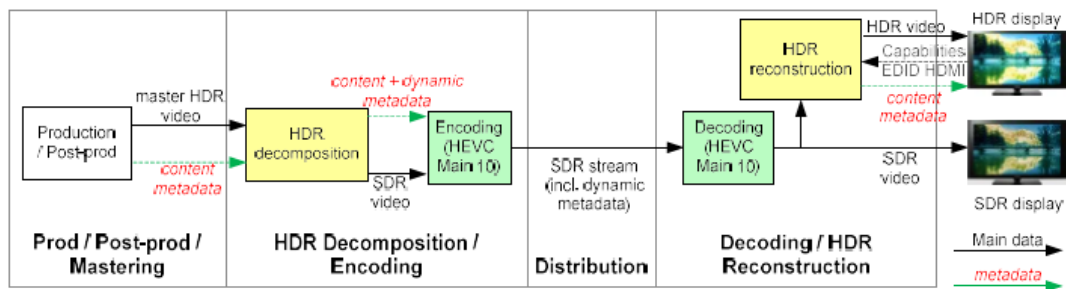


图 4-10: 单层 SL-HDR1 分发系统

图 9 中的框图更加详细地描述了 HDR 分解和重建的过程，HDR 分解的核心部分是 HDR 到 SDR 的转换，HDR 重建则是将 SDR 视频转换为 HDR 视频，视频的峰值亮度需要适应显示器的性能。

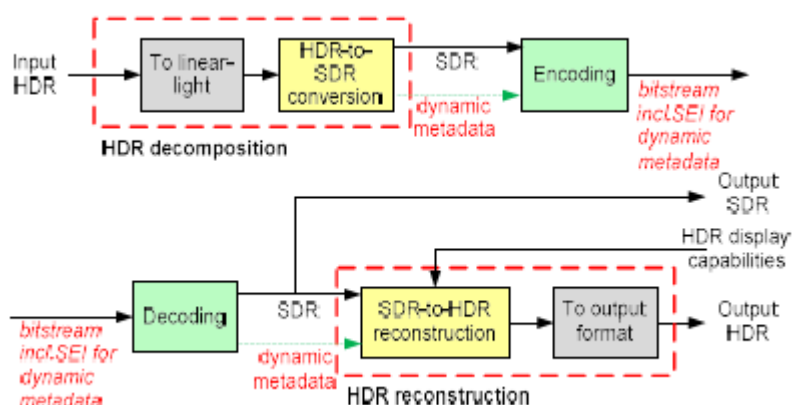


图 4-11: HDR 内容分解和重建过程

参考文献

- [1] Schulte T, Barsotti J. HDR Demystified: Emerging UHDTV Systems[J]. Technical paper, SpecraCal Inc, 2016.
- [2] SMPTE, Standard ST 2084:2014, September 2014, “High Dynamic Range Electro Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays”.
- [3] SMPTE, Standard ST 2094-1:2016, “Dynamic Metadata for Color Volume Transform - Core Components”.
- [4] François E, van de Kerkhof L. A single-layer HDR video coding framework with SDR compatibility[J]. 2016.
- [5] Dolby Laboratories, 2016, “Dolby Vision for the Home.” Retrieved from URL <http://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-vision/dolby-vision-white-paper.pdf>
- [6] SMPTE, Standard ST 2086:2014, “Mastering Display Color Volume Metadata Supporting High Luminance and Wide Color Gamut Images”.